



研究与开发

TS模式下STAR-RIS辅助的多用户无线系统波束成形设计

刘刚, 李铭泰, 潘澄, 郭漪, 付少忠

(西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 陕西 西安 710068)

摘要: 同时透射与反射可重构智能表面 (simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS) 具有同时透射与反射的特性, 能够将传统 RIS (conventional RIS, CRIS) 的通信能力从半空间扩展至全空间。针对 STAR-RIS 辅助下的多用户多输入单输出 (multiple-input single-output, MISO) 通信系统, 提出了一种基于时间切换 (time switch, TS) 模式的波束成形算法, 以实现发射功率最小化。该算法首先通过最大比传输 (maximum ratio transmission, MRT) 得到基站初始发射波束, 然后利用 TS 时隙正交性和信道增益最大化 (channel gain maximum, CGM) 将非凸优化问题解耦为恒模非凸问题和半正定规划 (semi-definite programming, SDP) 问题, 最后利用流形优化与内点法联合求解。仿真结果表明, STAR-RIS 相比 CRIS 可以有效降低发射功率; 所提算法在相同信干噪比下, 比主流算法具有更低的发射功率; TS 模式在低信干噪比下相较于能量分裂 (energy split, ES) 模式具有更低的发射功率。

关键词: 同时透射与反射可重构智能表面; 多用户; 波束成形; 最小化发射功率

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024244

STAR-RIS assisted multi-user wireless system beamforming design in TS mode

LIU Gang, LI Mingtai, PAN Cheng, GUO Yi, FU Shaozhong

State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710068, China

Abstract: Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface (STAR-RIS) has the capability of simultaneous transmission and reflection, extending the communication capacity of conventional RIS (CRIS) from half-space to full-space. For the multi-user multiple-input single-output (MISO) communication system assisted by STAR-RIS, a beamforming algorithm based on time switch (TS) mode was proposed to minimize transmission power. Firstly, maximum ratio transmission (MRT) was used to get the initial BS transmitting beamforming. Secondly, TS slot orthogonality and channel gain maximum (CGM) were used to decouple the non-convex problem into

收稿日期: 2024-07-13; 修回日期: 2024-10-17

通信作者: 李铭泰, limingtai2001@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171354); 陕西省自然科学基金资助项目 (No.2024JC-YBMS-533)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62171354), The Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No.2024JC-YBMS-533)

the constant mode non-convex problem and the semi-definite programming (SDP) problem. Finally, manifold optimization and interior point method were used to jointly solve these problems. The simulation results show that, STAR-RIS can effectively reduce the transmission power compared with conventional RIS. Under the same SINR (signal-to-noise ratio). The proposed algorithm has lower transmitting power than the mainstream algorithm. TS mode has lower transmitting power than energy splitting (ES) mode at low SINR.

Key words: STAR-RIS, multi-user, beamforming, minimize transmission power

0 引言

无线通信自 20 世纪 80 年代的第一代通信系统 (1G) 开始, 历经 40 年发展至第五代通信系统 (5G), 其通信速率、服务范围和服务用户数都得到了极大的提升。2020 年 5G 已经实现了 1 000 倍的无限容量提升, 这得益于各种关键的支持技术, 如超密集网络 (ultra-dense network, UDN)、大规模多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 和毫米波 (mmWave) 通信等^[1]。然而, 5G 网络架构无法解决未来十年内预期的超大数据流量, 其固有的高复杂度、昂贵的设备成本和高额的能源消耗都是目前所面临的关键问题。鉴于此, 学术界和工业界共同探索 5G 技术的下一阶段, 即 B5G (beyond 5G) 和 6G, 旨在达成更高的标准, 包含但不限于更高的数据传输速率和能源效率, 实现全球范围的覆盖与连接, 同时保证高可靠性与低时延通信^[1-6]。

可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 是一种新技术, 它通过软件控制反射单元的反射系数来重构无线传播环境^[7-10]。RIS 由大量低成本无源反射组件构成, 这些组件可以独立地调整其反射特性, 包括幅度和相位的改变, 从而共同构建出高精度的三维 (3D) 反射波束控制和优化无线信号的传播路径, 增强信号在复杂环境中的覆盖范围和质量。同时由于 RIS 的无源特性, RIS 与传统有源天线相比具有更低的功耗和硬件成本, 且不会引入额外的复杂干扰消除技术, 简化了网络设计和优化过程, 提升了系统的稳定性和可靠性。RIS 作为 B5G/6G 提升

网络性能的手段之一具有非常大的优势, 但是目前研究仍存在许多不足。大多数现有研究均考虑 RIS 只能反射入射无线信号的情况。在这种情况下, 发射机和接收机必须位于 RIS 的同一侧, 从而导致只能增强一半空间的智能无线电环境 (smart radio environment, SRE)。为了克服这一限制, 文献[11-12]中提出了同时透射和反射可重构智能表面 (simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS) 的新概念。STAR-RIS 通过控制单元的透射系数与反射系数, 对入射信号进行反射相位调控与透射相位调控, 从而实现一个高度灵活的全空间 SRE。这对于基站 (base station, BS) 的部署和波束成形算法的设计都带来更加灵活的发展空间。

文献[13]研究了一个 STAR-RIS 辅助的 MIMO 网络下基于能量分裂 (energy splitting, ES) 模式的最大化加权和速率优化问题。文献[14]提出了一种基于 STAR-RIS 的混合波束成形无线通信方案和 STAR-RIS 辅助无线系统的原型, 证实了 STAR-RIS 服务于两侧用户的能力, 并给出了 STAR-RIS 频谱效率与配置的关系。文献[15]通过与传统 RIS 辅助方案的比较, 发现 STAR-RIS 辅助系统由于覆盖范围的扩大, 可以获得更好的频谱效率, 并且在文献[16]中以最大限度地提高和速率为目标, 提出了一种迭代算法来有效地求解联合 STAR-RIS 反射相移和 BS 波束成形的优化问题。文献[17]通过有效容量 (effective capacity, EC) 分析研究了 STAR-RIS 辅助 NOMA 网络的实时服务性能。文献[18]从中断概率、覆盖率和吞



吞吐量方面评估了 STAR-RIS 辅助 NOMA 网络的性能。此外, STAR-RIS 辅助 NOMA 网络的安全性也备受关注。文献[19]研究了全窃听信道状态信息(channel state information, CSI)和统计窃听 CSI 上下行 NOMA 系统的安全传输问题。文献[20]通过分析保密中断概率,探讨了 STAR-RIS 辅助 NOMA 网络的保密性能。文献[21]为了对抗窃听,提出了一种通过人工噪声辅助的保密通信策略,利用提出的交替优化(AO)迭代算法对有源和无源波束成形矩阵进行优化,以获得较好的保密性能和较低的网络功率。

以上研究在 STAR-RIS 领域取得了很好的结果,但是目前研究主要考虑 STAR-RIS 处于 ES/MS 模式下的波束成形设计。而在 TS 模式下,尽管文献[22]提出了一种可行且快速的波束成形算法并被作为主流算法应用,但高能效的发射波束设计和透射/反射系数设计问题尚未得到令人满意的解决方案。主流算法虽然复杂度低,但是仅能得到优化问题的近似解。针对这一问题,本文提出了一种 MRT-CGM-MO 算法进行波束成形设计,能够得到 TS 模式下透射/反射系数的最优解。该算法首先利用最大比传输和信道增益最大化,将优化问题解耦为恒模问题和 SDP 问题,然后通过流形优化得到 STAR-RIS 的最优透射/反射系数,最后通过求解 SDP 问题得到最优时间参数和有源波束成形矩阵。仿真结

果表明,相较于主流的 TS 模式优化算法,本文优化算法在相同信干噪比要求下,可以达到更小的发射功率。

1 系统模型

STAR-RIS 常见的 3 种工作模式如图 1 所示,其中能量分裂(energy splitting, ES)模式利用 STAR-RIS 上的每个单元同时对入射信号进行透射/反射调控;模式切换(model switching, MS)模式通过将 STAR-RIS 每个单元配置为不同的模式来实现整个 STAR-RIS 上的透射/反射调控;时间切换(time switching, TS)模式通过时分方式将 STAR-RIS 的工作时间分为多个时隙,每个时隙选择透射或者反射模式。ES/MS 模式虽然能够在一个时隙内同时服务透射用户与反射用户,但是在单播通信中,其复杂度较高,并且还需要考虑 T 用户与 R 用户的干扰问题;TS 模式因为其时隙正交特性, T 用户与 R 用户被完全隔离,优化算法复杂度低,可以更好地应用于工程实践。本文考虑一个在室内场景下的窄带 TS 模式 STAR-RIS 辅助下行通信系统, STAR-RIS 辅助下的多用户 MISO 无线通信系统模型如图 2 所示。图 2 中,基站使用多天线阵列与多个单天线用户进行通信,并且包含一个由 M 个同时透射与反射 STAR 元素所构成的 STAR-RIS。通过 STAR-RIS 将空间分割为透射空间与反射空间,位于透射空间的用

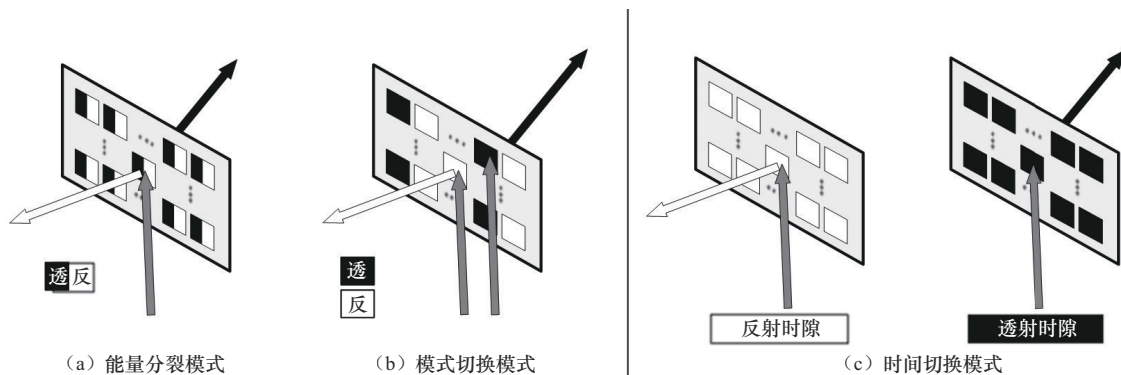


图1 STAR-RIS 常见的 3 种工作模式

户称为T用户，而位于反射空间的用户称为R用户。特别指出，这里假设基站和用户之间的直接通信链路被障碍阻塞，这也是传统通信系统中最具挑战性的场景之一，本文通过部署STAR-RIS，建立额外的透射和反射链路，为信号盲区中的用户提供通信服务。

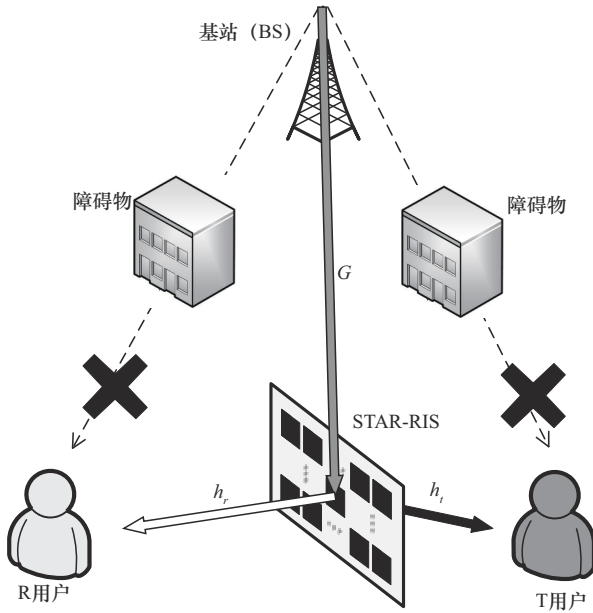


图2 STAR-RIS辅助下的多用户MISO无线通信系统模型

假设系统中存在两个用户分别位于STAR-RIS两侧，反射空间下的反射用户配备为单天线，透射空间下的透射用户同样配备为单天线，即STAR-RIS辅助的MISO通信系统服务于一个T用户和一个R用户。在TS模式，各个时隙之间是相互正交的，两个连续的正交时隙构成一个时隙组（分别服务于一个T用户和一个R用户），系统利用多个正交时隙组实现STAR-RIS透射端和反射端的多用户之间的信息传输。由于各个时隙组之间相互独立，不失一般性，以一个正交时隙组（仅考虑一个T用户和一个R用户）为例进行分析。基站采用由 N 个天线构成的ULA天线阵列，STAR-RIS采用由 M 个天线构成的URA天线阵列，基站到STAR-RIS的信道可以表示为

$\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ ，STAR-RIS到用户 $i \in \{t, r\}$ 的信道表示为 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ，为了得到STAR-RIS能够达到的最大性能增益，这里假设基站已知所有信道的完美CSI。

从基站经STAR-RIS到用户 i 的等效基带模型可以表示为：

$$\mathbf{t}_{\text{TS}}^i = \mathbf{h}_i^H \Phi_{\text{TS},i} \mathbf{G}, i \in \{t, r\} \quad (1)$$

其中， $\Phi_{\text{TS},i}, i \in \{t, r\}$ 代表透射/反射系数矩阵。基于基带等效模型，用户 i 的接收信号为：

$$y_{\text{TS}}^i = \mathbf{t}_{\text{TS}}^i{}^H (\omega_t s_t + \omega_r s_r) + u_i, i \in \{t, r\} \quad (2)$$

其中， $\omega_t \in \mathbb{C}^{N \times 1}, \omega_r \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别表示发射基站发送给T用户和R用户的波束成形向量， s_t, s_r 分别表示需要发送给T用户和R用户的数据符号，并且有 $s_i \sim \mathcal{CN}(0, 1), i \in \{t, r\}$ ， u_i 为用户 i 处接收到的噪声，服从复高斯分布 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 。

由于TS模式的客户服务在不同的正交时隙，BS可以使用不同的有源波束成形向量，发射基站在不同时间隙期间连续向用户发送信息。因此，用户 i 对应的可实现通信速率 R_{TS}^i 可以表示为：

$$R_{\text{TS}}^i = \lambda^i \log \left(1 + \frac{|\left(\mathbf{t}_{\text{TS}}^i \right)^H \omega_i|^2}{\lambda^i \sigma_i^2} \right) \quad (3)$$

其中，分式下半部分的 λ^i 是由于发射基站使用了总通信时间的 λ^i 部分用于波束成形向量为 ω_i 的用户 i 通信。所以对于用户 i 的传输功率需要增加 $1/\lambda^i$ ，以确保与ES模式和MS模式的公平比较。

TS模式通过利用正交时隙操作STAR-RIS在透射模式与反射模式之间进行切换，因此优化问题需要增加对于 λ^i 系数的约束和优化。TS优化问题可以表示为如下(P1)形式：

$$(P1): \min_{\omega_t, \omega_r, \lambda^i, \Phi_{\text{TS},i}} \|\omega_t\|^2 + \|\omega_r\|^2 \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } R_{\text{TS}}^i \geq \bar{R}^i, i \in \{t, r\} \quad (4b)$$

$$\Phi_{\text{TS},i} \in \mathcal{F}_{\text{TS}}, i \in \{t, r\} \quad (4c)$$



$$0 \leq \{\lambda^t, \lambda^r\} \leq 1, \lambda^t + \lambda^r = 1 \quad (4d)$$

其中, $\mathcal{F}_{\text{TS}}$ 为 TS 模式下 STAR-RIS 透射/反射系数矩阵所对应的可行集, $\bar{R}^i$ 表示用户 i 的可达速率门限。

2 波束成形与透射反射系数设计

2.1 MRT-CGM: 解耦优化问题

定义透射/反射系数向量 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}}$ 为:

$$\mathbf{q}_i^{\text{TS}} = [\eta_{i,1} e^{j\theta_{i,1}}, \eta_{i,1} e^{j\theta_{i,2}}, \eta_{i,1} e^{j\theta_{i,3}}, \dots, \eta_{i,1} e^{j\theta_{i,M}}]^H, \quad \forall i \in \{t, r\} \quad (5)$$

矩阵变换能够得到 $\mathbf{h}_i^H \Phi_{\text{TS},i} \mathbf{G} = (\mathbf{q}_i^{\text{TS}})^H \mathbf{H}_i \omega_i$, 其中 $\mathbf{H}_i = \text{diag}(\mathbf{h}_i^H) \mathbf{G}_i$, $\text{diag}(\mathbf{h}_i^H)$ 为对角化向量 $\mathbf{h}_i^H$ 。将对应的可行集展开, 并且利用上述定义式对可达速率 R_{TS}^i 进行变形, 问题可以重写为:

$$(P1'): \min_{\omega_t, \omega_r, \lambda^t, \mathbf{q}_i^{\text{TS}}} \|\omega_t\|^2 + \|\omega_r\|^2 \quad (6a)$$

$$\text{s.t. } \lambda^i \text{lb} \left(1 + \frac{|\left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^H \omega_i|^2}{\lambda^i \sigma_i^2} \right) \geq \bar{R}^i, i \in \{t, r\} \quad (6b)$$

$$\left| [\mathbf{q}_i^{\text{TS}}]_m \right| = 1, i \in \{t, r\}, m \in \{1, 2, 3, \dots, M\} \quad (6c)$$

$$0 \leq \{\lambda^t, \lambda^r\} \leq 1, \lambda^t + \lambda^r = 1 \quad (6d)$$

由 TS 模式可知, 每个时隙只会由一个用户通过 STAR-RIS 进行通信。而对于给定的透射/反射系数矩阵, 采用传统有源波束成形设计方案, 即最大比传输 (MRT) 波束成形, 可以得到包含 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}}$ 的最佳发射波束 ω_i^{opt} 为:

$$\omega_i^{\text{opt}} = \sqrt{p_i} \frac{\mathbf{H}_i \mathbf{q}_i^{\text{TS}}}{\left\| \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^H \mathbf{H}_i \right\|_2} \quad (7)$$

其中, p_i 为用户 i 的发射功率。进一步将 ω_i^{opt} 代入优化问题 (P1') 可得到:

$$(P1''): \min_{p_t, p_r, \lambda^t, \mathbf{q}_i^{\text{TS}}} p_t + p_r \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } \lambda^i \text{lb} \left(1 + \frac{p_i \left\| \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^H \mathbf{H}_i \right\|_2^2}{\lambda^i \sigma_i^2} \right) \geq \bar{R}^i, i \in \{t, r\} \quad (8b)$$

$$(6a) \quad (6d) \quad (8c)$$

根据 TS 模式正交特性, 可以对每个不同用户单独优化。因为最优的透射/反射系数向量可以使用户的有效信道增益达到最大, 所以根据有效信道增益最大 (CGM) 原则, 可以得到:

$$(P1'''): \max_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}}} \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^H \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \mathbf{q}_i^{\text{TS}}, i \in \{t, r\} \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } \left| [\mathbf{q}_i^{\text{TS}}]_m \right| = 1, i \in \{t, r\}, m \in \{1, 2, 3, \dots, M\} \quad (9b)$$

2.2 MO: 有源与无源波束成形设计

由于优化问题 (P1''') 目标函数连续可微, 且 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}}$ 的约束集 $\left| [\mathbf{q}_i^{\text{TS}}]_m \right| = 1, i \in \{t, r\}, m \in \{1, 2, 3, \dots, M\}$ 为一个复圆流形 $\mathcal{M} = \left\{ \mathbf{q}_i^{\text{TS}} \in \mathbb{C}^M : [\mathbf{q}_i^{\text{TS}}]_1 = [\mathbf{q}_i^{\text{TS}}]_2 = \dots = [\mathbf{q}_i^{\text{TS}}]_M = 1 \right\}$, 因此本文考虑利用流形优化 (MO) 对 (P1''') 进行求解。流形优化步骤如图 3 所示。

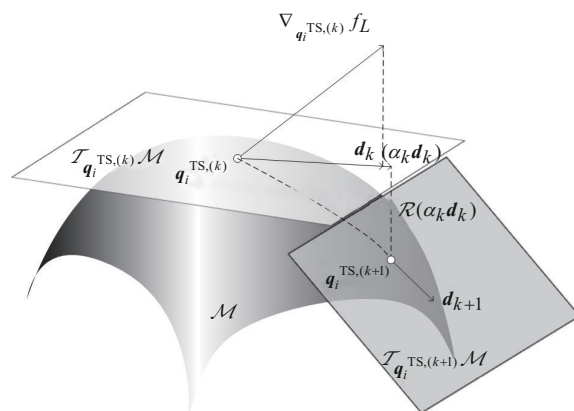


图3 流形优化步骤

定义函数:

$$f_L(\mathbf{q}_i^{\text{TS}}) = \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^H \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \mathbf{q}_i^{\text{TS}}, i \in \{t, r\} \quad (10)$$

对于优化过程中任何一个第 k 次迭代点 $\mathbf{q}_i^{\text{TS},(k)}$, 其切向空间由沿切向通过 $\mathbf{q}_i^{\text{TS},(k)}$ 的所有切向向量组成。每个切向向量代表一个方向, 通过

沿着切向向量方向迭代 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}$ 对目标函数进行优化。

对于复圆流形 $\mathcal{M}$ 来说, 其在迭代点 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}$ 处的切向空间可以表示为:

$$\mathcal{T}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}}\mathcal{M} = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{C}^M : \text{Re} \left\{ \mathbf{x} \circ \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \right)^* \right\} = \mathbf{0}_M \right\} \quad (11)$$

其中, $\circ$ 表示矩阵的哈达玛积。与欧氏空间类似, 切向向量中使得目标函数增长速度最快的向量方向称为黎曼梯度。如图 3 所示, 目标函数在迭代点 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}$ 处的黎曼梯度 $\text{grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L$ 是欧氏梯度 $\nabla_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L$ 在切空间 $\mathcal{T}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}}\mathcal{M}$ 的正交投影, 迭代点 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}$ 在复圆流形 $\mathcal{M}$ 上的黎曼梯度可以表示为:

$$\begin{aligned} \text{Grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L &= \nabla_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L - \text{Re} \\ &\left\{ \nabla_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L \circ \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \right)^* \right\} \circ \mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 欧氏梯度 $\nabla_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L = 2\mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \right)$, 基于此, 能够将欧氏空间中的优化技术移植到流形空间中, 例如, 使用欧氏空间中共轭梯度 (conjugate gradient, CG) 法得到流形空间中迭代点的搜索方向:

$$\mathbf{d}_{k+1} = -\text{grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}} f_L + \beta_k \mathcal{D}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \rightarrow \mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}}(\mathbf{d}_k) \quad (13)$$

其中, β_k 为共轭梯度更新系数, 具体数值为 Polak-Ribiere 参数^[23]。 $\mathcal{D}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \rightarrow \mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}}(\mathbf{d}_k)$ 为复圆流形 $\mathcal{M}$ 的向量转换函数, 定义了一个切向量到另一个切向量的映射, 具体函数为:

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \rightarrow \mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}}(\mathbf{d}_k) &= \mathbf{d}_k - \text{Re} \\ &\left\{ \mathbf{d}_k \circ \left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)} \right)^* \right\} \circ \mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)} \end{aligned} \quad (14)$$

在搜索完成后, 需要利用回缩函数映射回流形空间中。对于复圆流形, 回缩函数 $\mathcal{R}(\alpha_k \mathbf{d}_k)$ 为:

$$\mathcal{R}(\alpha_k \mathbf{d}_k) = \mathcal{T}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}}\mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M} = \frac{\alpha_k \mathbf{d}_k}{|\alpha_k \mathbf{d}_k|} \quad (15)$$

α_k 是符合 Armijo 准则的迭代更新系数, 基于回缩函数, 能够给出最终的迭代回缩准则为:

$$\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)} \leftarrow \frac{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} + \alpha_k \mathbf{d}_k}{|\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} + \alpha_k \mathbf{d}_k|} \quad (16)$$

基于上述迭代准则可以得到透射和反射系数向量的期望值 $\left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^{\text{opt}}$ 。将 $\left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^{\text{opt}}$ 代入问题 (P1''), 可以得到另一个包含 p^i 和 λ^i 的子问题 (P1'''):

$$(\text{P1}'''): \min_{p_t, p_r, \lambda^i} p_t + p_r \quad (17a)$$

$$\text{s.t. } \lambda^i \text{ lb} \left[1 + \frac{p_i \left\| \left(\left(\mathbf{q}_i^{\text{TS}} \right)^{\text{opt}} \right)^H \mathbf{H}_i \right\|^2}{\lambda^i \sigma_i^2} \right] \geq \bar{R}^i, i \in \{t, r\} \quad (17b)$$

$$(6d) \quad (17c)$$

(P1''') 为一个 SDP 凸问题, 通过传统凸优化方法能够得到最优解, 本算法采用内点法对该问题进行求解。

基于 TS-STAR-RIS 的 MRT-CGMMO 算法如下。

初始化输入: 利用 MRT 得到初始有源波束成形矩阵

基于 MRT 利用 CGM 将问题解耦为恒模问题与 SDP 问题

设置初值迭代点 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(0)}$ 和迭代次数 $k=0$, 通过式 (12) 计算 $\mathbf{d}_0 = \text{grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(0)}} f_L$

while $\left\| \text{grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L \right\|_2 \geq \epsilon_{\text{MRT-CGM-MO}}$ 并且迭代

次数 $k \leq K_{\text{MRT-CGM-MO}}$

选择合适的 Armijo 更新系数 α_k

通过回缩函数式 (16) 计算下一个迭代点 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}$

基于 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}$ 使用式 (12) 得到切空间黎曼梯度 $\text{grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}} f_L$

计算切向量转换函数

$\mathcal{D}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)} \rightarrow \mathbf{q}_i^{\text{TS}(k+1)}}(\mathbf{d}_k)$

选择合适的共轭梯度更新系数 β_k



通过式 (13) 计算搜索方向 $\mathbf{d}_{k+1}$

设置迭代次数 $k = k + 1$

end while

利用 CVX 工具箱求解 SDP 问题

输出: 最优功率系数, 时间分裂系数, 透射/

反射系数 $\{p_t, p_r, \lambda^i, \mathbf{q}_i^{\text{TS}}\}^{\text{opt}}$

2.3 收敛性分析

MRT-CGM-MO 算法可分为最大比传输 (MRT) 阶段和流形优化 (MO) 阶段, 其收敛性由 MO 阶段决定。MRT 阶段是在给定信道和透射/反射系数矩阵的情况下, 通过一个闭式解得到最优的有源波束成形向量, 并不涉及多轮迭代的过程, 对收敛性没有影响。由于 MRT 不改变透射/反射系数的优化逻辑, 整个算法的收敛性由 MO 阶段决定。MO 阶段是在信道增益最大化条件下, 在复圆流形上对透射/反射系数 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}}$ 进行迭代优化。计算黎曼梯度确保每次迭代能够沿着负梯度方向下降, 使用 Polak-Ribiere 参数来更新共轭方向, 加速迭代过程, 减少了算法的收敛时间, 同时, 为了确保每一步更新是有效的, 利用 Armijo 回溯线搜索准则, 选择合适步长, 确保每次迭代能够使目标函数值单调下降, 避免陷入局部振荡或步长过小的情况, 使得 $\mathbf{q}_i^{\text{TS}}$ 最终能够收敛到局部最优解。

该问题本质上是凸优化问题, MRT-CGM-MO 算法通过流形优化的特性保证了局部收敛^[23], 即目标函数在流形上连续可微且流形空间完备有界, 因此每个迭代序列都会逐步接近某个局部极小值。通过设定梯度模的阈值 $\|\text{grad}_{\mathbf{q}_i^{\text{TS}(k)}} f_L\|_2 < \epsilon_{\text{MRT-CGM-MO}}$, 当小于指定的收敛精度时迭代停止, 确保算法收敛到临界点。共轭梯度法的使用进一步减少了冗余的计算步骤, 并利用历史迭代信息优化搜索方向, 提高了算法的整体效率。综上, MRT-CGM-MO 算法的每一

步在理论上保证了收敛性, 并在有限次迭代能够有效地找到局部最优解, 具有良好的收敛性和计算效率。

2.4 复杂度分析

基于 TS-STAR-RIS 的 MRT-CGM-MO 算法的复杂度主要通过以下 3 个部分来计算: 在 MRT 阶段, 复杂度主要来源于信道矩阵的乘法运算, 该阶段复杂度为 $\mathcal{O}(NM)$, N 为基站天线数, M 为 RIS 单元数; 在 MO 迭代阶段, 使用共轭梯度法进行迭代, 每次迭代过程中结合当前梯度与上一次迭代搜索方向更新共轭搜索方向, 加快收敛速度, 该阶段复杂度为 $\mathcal{O}(I_{\text{MO}} M^{1.5})$ ^[24], 其中 I_{MO} 为迭代次数; 在资源分配阶段, 复杂度为 $\mathcal{O}((2L)^{3.5})$ ^[25], L 为用户数。则 MRT-CGM-MO 算法的复杂度为 $\mathcal{O}(NM + (I_{\text{MO}} M^{1.5} + (2L)^{3.5}))$ 。

3 仿真结果

仿真考虑包含 1 个透射 T 用户和 1 个反射 R 用户, STAR-IRS 仿真设置如图 4 所示。其中发射基站和 STAR-RIS 分别位于坐标原点 (0, 0) 与 x 正半轴 (50 m, 50 m) 上, 透射用户和反射用户位于以 STAR-RIS 为中心, 半径为 $r=5$ m 的单位圆内, 发射基站到透射用户和反射用户的直射路径被阻断。STAR-RIS 由均匀矩阵构成, 单元数 $M=M_x M_y$ 。从 BS 到 STAR-RIS 和从 STAR-RIS 到两个用户的窄带准静态衰落信道被建模为 Rician 衰落信道。

$$\mathbf{G} = \sqrt{\frac{\rho_0}{d_{\text{BS-STAR}}^{\alpha_{\text{BS-STAR}}}}} \left(\sqrt{\frac{K_{\text{BS-STAR}}}{K_{\text{BS-STAR}} + 1}} \mathbf{G}_{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{BS-STAR}} + 1}} \mathbf{G}_{\text{NLoS}} \right) \quad (18)$$

$$\mathbf{h}_i = \sqrt{\frac{\rho_0}{d_{\text{STAR-USER}}^{\alpha_{\text{STAR-USER}}}}} \left(\sqrt{\frac{K_{\text{STAR-USER}}}{K_{\text{STAR-USER}} + 1}} \mathbf{h}_{i,\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{STAR-USER}} + 1}} \mathbf{h}_{i,\text{NLoS}} \right) \quad (19)$$

其中, $d_{\text{BS-STAR}}$ 和 $d_{\text{STAR-USER}}$ 分别代表 BS 和

STAR-RIS 之间的距离、STAR-RIS 到用户之间的距离； $\alpha_{\text{BS-STAR}}$ 和 $\alpha_{\text{STAR-USER}}$ 为对应的路径损耗指数； $K_{\text{BS-STAR}}$ 和 $K_{\text{STAR-USER}}$ 表示 Rician 因子。 ρ_0 为参考距离为 1 m 时的路径损耗， $\mathbf{G}_{\text{LoS}}$ 和 $\mathbf{h}_{i,\text{LoS}}$ 是 LoS 分量， $\mathbf{G}_{\text{NLoS}}$ 和 $\mathbf{h}_{i,\text{NLoS}}$ 是建模为瑞利衰落的 NLoS 分量。假设传输中的两个用户具有相同的 QoS 要求，即 $\bar{R}_t = \bar{R}_r = \text{lb}(1 + \gamma_0)$ 。 γ_0 是要求的最低信干噪比 (SINR)。所有仿真结果均为 1 000 次随机信道参数下的平均值。并且将 ES 模式的逐次凸逼近 (successive convex approximation, SCA) 算法，传统 RIS 和 TS 模式的 SDR 算法作为基线进行比较。STAR-RIS 仿真参数设置见表 1。

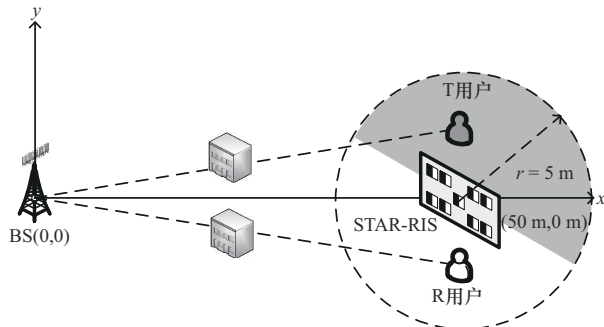


图4 STAR-RIS 仿真设置

表1 STAR-RIS 仿真参数设置

参数	含义	取值
$\alpha_{\text{STAR-USER}}$	STAR-RIS 到用户信道的路径损耗指数	2.2
$\alpha_{\text{BS-STAR}}$	BS 到 STAR-RIS 信道的路径损耗指数	2.2
$K_{\text{BS-STAR}}$	STAR-RIS 到用户信道的 Rician 因子	3 dB
$K_{\text{BS-STAR}}$	BS 到 STAR-RIS 信道的 Rician 因子	3 dB
ρ_0	距离 1 m 时的路径损耗	-30 dB
σ_i^2	接收端的噪声功率	-90 dBm
$\epsilon_{\text{MRT-CGM-MO}}$	流形优化收敛容差门限	10^{-6}
$K_{\text{MRT-CGM-MO}}$	流形优化最大迭代次数限制	100

发射功率与 SINR 的关系如图 5 所示，分别仿真了 STAR-RIS 单元数 $M=10$ 时 ES 协议和 TS 协议下的功率消耗，同时将传统 RIS (CRIS) 作为基线进行了对比，具体如下。

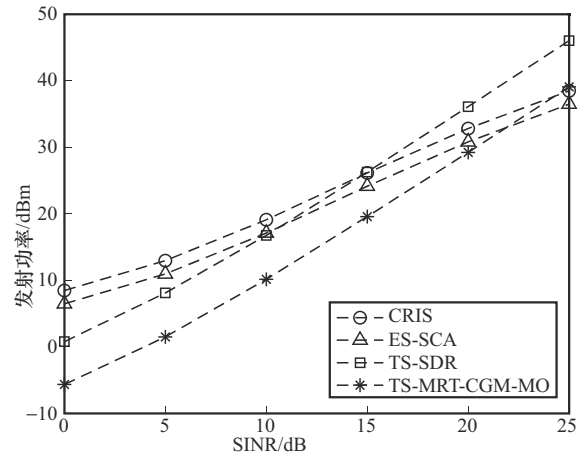


图5 发射功率与 SINR 的关系

(1) STAR-RIS 的两种操作模式在性能上均优于 CRIS，具体地，ES 模式下采用 SCA 算法所需发射功率始终低于 CRIS，TS 模式下采用 SDR 算法所需发射功率在小于 15 dB 的 SINR 条件下始终低于 CRIS，这是由于 STAR-RIS 能够同时控制信号的透射和反射，从而在无线信道优化中提供更多调控选项，相较于传统 RIS 具有更高的自由度。

(2) TS 模式在低 SINR 的情况下性能要优于 ES 模式，这是由于 TS 模式下，每个用户的时隙相互正交，低 SINR 所造成的其余用户干扰对 TS 模式影响很小，但随着 SINR 的增大，用户间干扰的影响逐渐减小，而 TS 模式的无干扰通信是以对通信时间的低效利用为代价来实现的，在高 SINR 下，TS 模式需要更大的发射功率，所以 ES 模式性能逐渐优于 TS 模式。

(3) 本文提出的 MRT-CGM-MO 算法相较于 SDR 算法具有更好的性能，这是因为 SDR 算法所采用的是放松约束的方法来找到最优近似解，而 MRT-CGM-MO 算法是将约束转换到流形上求解得到最优解，所以 MRT-CGM-MO 的性能要优于 SDR。

发射功率与 STAR-RIS 单元数的关系如图 6 所示，可以看出：(1) 随着单元数 M 的增加，



STAR-RIS 和 CRIS 的所需发射功率都在降低,这是因为更多的单元能够带来更高的透射和反射增益,从而降低所需发射功率;(2)在相同单元数下,STAR-RIS 性能优于 CRIS;(3)TS 模式要明显优于传统 RIS 与 ES 模式,这是因为 TS 模式下每个用户可以无干扰进行通信,而低 SINR 下 ES 模式还需要考虑用户之间的干扰问题。对比 SDR 与 MRT-CGM-MO 算法能看出本文提出的 MRT-CGM-MO 算法要优于 SDR 算法,但是随单元数的增加,两种算法的差距在逐渐缩小。

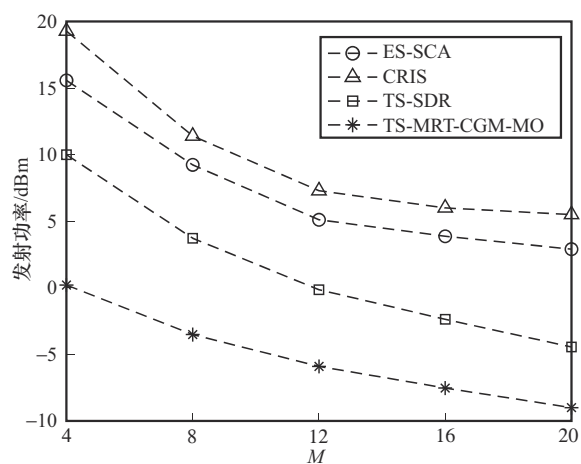


图6 发射功率与STAR-RIS单元数的关系

发射功率与BS天线数的关系如图7所示,仿真中最小 SINR=0, STAR-RIS 和 CRIS 的单元数 M 均为 10。可以看出:(1)随着BS天线数 N 的增长,所需发射功率都在降低,这是因为随着天线数目的增多,可以利用更多天线进行透射/反射系数设计,使得有源波束成形的增益不断上升,从而降低发射功率的消耗,但随着天线数增多,增加相同天线数所带来的增益也在逐渐降低;(2)在相同BS天线数条件下,STAR-RIS 对发射功率的降低要优于 CRIS;(3)在相同BS天线数条件下,本文所提 MRT-CGM-MO 算法性能优于其他两种 STAR-RIS 基准方案。

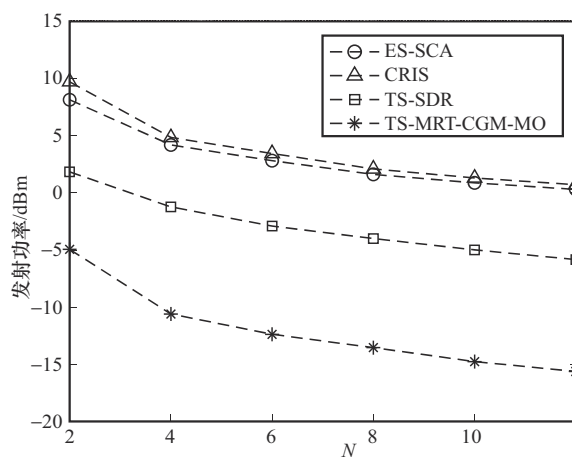


图7 发射功率与BS天线数的关系

发射功率与用户距离STAR-RIS的关系如图8所示,仿真中最小 SINR=0, STAR-RIS 和 CRIS 的单元数 M 均为 10,并且假设两个用户分别位于 STAR-RIS 的两个半空间内,且两用户初始距离基站为 20 m。可以看出:(1)当两个用户接近 STAR-RIS 时,发射功率逐渐降低,这是因为随着用户接近 STAR-RIS,信道衰落逐渐变小,所以用户能够接收到更多信号功率,发射功率随之降低;(2)在相同距离设置下,STAR-RIS 对发射功率的降低要优于 CRIS;(3)在相同距离设置下,本文提出 MRT-CGM-MO 算法性能优于其他两种 STAR-RIS 基准方案。

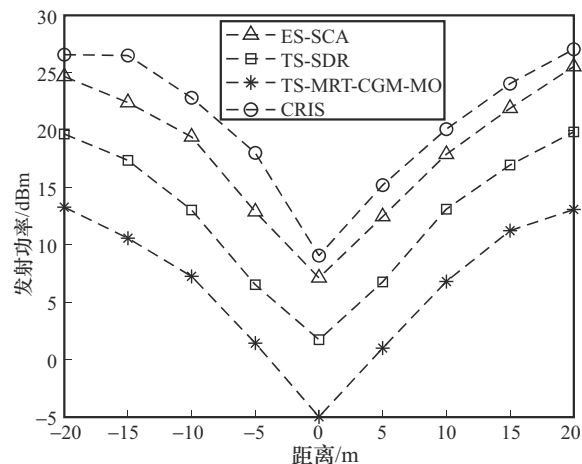


图8 发射功率与用户距离STAR-RIS的关系

发射功率与迭代次数的关系如图9所示, 仿真中最小 SINR=0, STAR-RIS 与 CRIS 的单元数 $M=10$, 发射天线数 $N=2$ 。可以看出: (1) SDR 算法在一次迭代后就已经达到收敛, 而 MRT-CGM-MO 算法需要 12~13 次迭代后才能达到收敛; (2) SDR 由于其求解的是次优解, 所以收敛后的性能要比 MRT-CGM-MO 算法收敛后的性能差, 但是这种性能需要一定迭代次数作为代价, 在低迭代次数下, MRT-CGM-MO 算法性能要差于 SDR 算法, 当迭代次数大于 5 后, MRT-CGM-MO 算法性能要优于 SDR 算法。

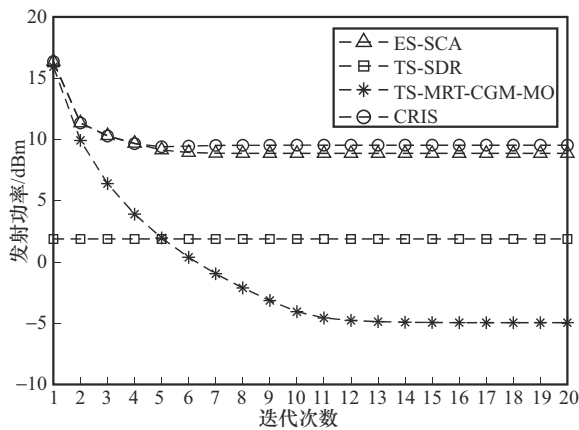


图9 发射功率与迭代次数的关系

4 结束语

本文考虑了 STAR-RIS 辅助下的 MISO 无线通信系统模型, 构建了 TS 模式下的优化问题模型, 提出了一种 MRT-CGM-MO 算法。该算法首先利用时隙正交性, 采用 MRT 和 CGM 原则将优化问题分解为两个子问题, 对于恒模问题使用 MO 在流形约束空间上得到最优透射/反射系数, 然后对于包含时间参数与发射波束向量的 SDP 问题使用内点法得到问题的最优解。仿真结果验证了 STAR-RIS 所提算法相较于传统 RIS 与主流 SDR 方法的优越性, 并且验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] BOCCARDI F, HEATH R W, LOZANO A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 74-80.
- [2] HAN H, CAO Y, DENG N, et al. Secure transmission for STAR-RIS aided NOMA against internal eavesdropping[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(11): 15068-15073.
- [3] VAIGANDLA K K. Communication technologies and challenges on 6G networks for the Internet: internet of things (IoT) based analysis[C]//Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 27-31.
- [4] WU Q Q, LI G Y, CHEN W, et al. An overview of sustainable green 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 72-80.
- [5] ZHAO J. A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs): towards 6G wireless communication networks[EB]. 2019: 1907.04789.
- [6] PAN C, GUO Y, LIU G, et al. Modeling and coverage analysis of heterogeneous sub-6GHz-millimeter wave networks[J]. Journal of Information and Intelligence, 2023, 1(4): 321-329.
- [7] HUANG C W, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Achievable rate maximization by passive intelligent mirrors[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 3714-3718.
- [8] TAN X, SUN Z, KOUTSONIKOLAS D, et al. Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 270-278.
- [9] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [C]//Proceedings of the IEEE Transactions on Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5394-5409.
- [10] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18 (11): 5394-5409.
- [11] LIU Y W, MU X D, XU J Q, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 102-109.
- [12] XU J Q, LIU Y W, MU X D, et al. Simultaneously transmit-



- ting and reflecting intelligent omni-surfaces: modeling and implementation[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2022, 17(2): 46-54.
- [13] NIU H H, CHU Z, ZHOU F H, et al. Weighted sum rate optimization for STAR-RIS-assisted MIMO system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(2): 2122-2127.
- [14] ZHANG H L, ZENG S H, DI B Y, et al. Intelligent omni-surfaces for full-dimensional wireless communications: principles, technology, and implementation[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(2): 39-45.
- [15] ZHANG S H, ZHANG H L, DI B Y, et al. Beyond intelligent reflecting surfaces: reflective-transmissive metasurface aided communications for full-dimensional coverage extension[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13905-13909.
- [16] ZHANG S H, ZHANG H L, DI B Y, et al. Intelligent omni-surfaces: ubiquitous wireless transmission by reflective-refractive metasurfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(1): 219-233.
- [17] LIU H L, LI G, LI X W, et al. Effective capacity analysis of STAR-RIS-assisted NOMA networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(9): 1930-1934.
- [18] YUE X W, XIE J, LIU Y W, et al. Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface assisted NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(1): 189-204.
- [19] ZHANG Z, CHEN J, LIU Y W, et al. On the secrecy design of STAR-RIS assisted uplink NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(12): 11207-11221.
- [20] LI X W, ZHENG Y K, ZENG M, et al. Enhancing secrecy performance for STAR-RIS NOMA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2684-2688.
- [21] HAN Y, LI N, LIU Y W, et al. Artificial noise aided secure NOMA communications in STAR-RIS networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(6): 1191-1195.
- [22] MU X D, LIU Y W, GUO L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3083-3098.
- [23] ABSIL P A, MAHONY R, SEPULCHRE R. Optimization algorithms on matrix manifolds[M]. USA: Princeton University Press, 2008.
- [24] YU X H, XU D F, SCHÖBER R. MISO wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces: (invited paper) [C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 735-740.
- [25] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

[作者简介]



刘刚 (1977-), 男, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为宽带无线传输技术。



李铭泰 (2001-), 男, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信、智能超表面技术。



潘澄 (1999-), 男, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线通信、智能超表面技术。



郭漪 (1977-), 女, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为B5G/6G智能传输关键技术。



付少忠 (1975-), 男, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为宽带无线通信技术。